



تاثیر نانو سیلیس و پودر شیشه بر روی مشخصه های فیزیکی بتن

سید رحیم بهارآور^{۱*}، عارف جاهد^۲

^{۱*} / استادیار گروه عمران، موسسه آموزش عالی شمس گنبد، گنبد کاووس، ایران

^۲ / کارشناس ارشد عمران گرایش سازه، موسسه آموزش عالی شمس گنبد، گنبد کاووس، ایران

(Email: seyedbah80@gmail.com)

(تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۴/۰۲/۲۹، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۱۴)

چکیده

در این تحقیق از نانو سیلیس و پودر شیشه برای ارتقاء مقاومت فشاری و دیگر مشخصه های فیزیکی بتن استفاده شده است. برای بالا بردن تراکم بتن ها بعد از کسب مقاومت از نانو سیلیس و پودر شیشه با درصدهای ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ و همچنین از پودر شیشه با همین درصدها ترکیب شده است. نمونه های بعدی نیز با ترکیب نانو سیلیس با پودر شیشه به صورت مشترک به جای سیلیس تهیه شده اند. در این تحقیق جمعا ۳۲۴ نمونه مکعب بتنی در ابعاد ۵ سانتیمتری تهیه و آزمایشهای مقاومت فشاری، کرناته شدن و ذوب و انجماد بر روی آنها اعمال شد است و نتایج استخراج گردیده است. با توجه به نتایج نمونه Sn4 در آزمایشها بهترین و نمونه Sng4 ضعیفترین ترکیب را حاصل نموده اند.

کلمات کلیدی

نانو سیلیس، پودر شیشه، مقاومت فشاری، کرناته شدن.



The Effect of Nano Silica and Glass Powder on the Physical Characteristics of Concrete

Seyedrahim Baharavar ^{1*}, Aref Jahed ²

^{*1} Assistant Professor of Civil Engineering Department, Shams Gonbad Higher Education Institute, Gonbadkavos, Iran

² Master of Civil Engineering Department, Shams Gonbad Higher Education Institute, Gonbadkavos, Iran

(Email: seyedbah80@gmail.com)

(Date of received: 19/05/2025, Date of accepted: 05/08/2025)

ABSTRACT

In this research, nano silica and glass powder have been used to improve the compressive strength and other physical characteristics of concrete. In order to increase the density of the concrete after gaining strength, it is combined with nano silica and glass powder with percentages of 5, 10, 15 and 20, as well as glass powder with the same percentages. The next samples were also prepared by combining nano-silica with glass powder instead of silica. In this research, a total of 324 concrete cube samples of 5 cm diameter have been prepared and compressive strength, carbonation, melting and freezing tests have been performed on them and the results have been extracted. According to the results of the Sn4 sample in the experiments, the best and the Sng4 sample obtained the weakest combination.

Keywords:

Nano silica, Glass Powder, Compressive Strength, Carbonation.



۱- مقدمه

در طول سالها بتن به عنوان یکی از مهمترین مصالح کاربردی در زندگی انسان نقش داشته است و مهندسين و دانشمندان همیشه دغدغه ارتقای این مصالح را از لحاظ مقاومتی و دوام داشته اند و همیشه در پی ماده ای بودند تا بتوانند جایگزین سیمان مصرفی در بتن گردند تا هم از لحاظ محیط زیستی جلوی تخریب محیط زیست را به واسطه برداشتهای مواد اولیه گرفته باشند و هم اینکه بتوانند در کاهش آلودگی هوا نقشی ایفا کنند. مواد افزودنی عمدتاً موادی هستند که میتوانند به جای قسمتی از سیمان جایگزین گردند و مقاومت آن را نیز حفظ یا افزایش دهند. مواد افزودنی بیشتر مواد بازیافتی یا پس ماند های کارخانه ای هستند که اگر در محیط رها گردند موجبات آلودگی و به ه زدن اکوسیستم محیط زیست می شوند. در این تحقیق سعی شده است با جایگزینی پودر شیشه حاصل از شیشه های زباله به بررسی ویژگیهای بتن بپردازیم.

۲-پوزولانها

پوزولان از اسم دهکده pouzzuoli در نزدیکی آتش فشان وزو قرار دارد و برای اولین بار خاکستر آتش فشانی را در این محل پیدا نموده اند، گرفته شده است. این سیمان ها از آسیاب کردن و مخلوط کردن پوزولان ها (خاک های طبیعی و مصنوعی جایگزین سیمان) با سیمان پرتلند ساخته می شود. بر طبق آیین ناهای ASTM C618-94a پوزولان را چنین تعریف کرده اند: پوزولان سیلیسی یا سیلیس آلومینیومی است که به تنهایی خاصیت چسبندگی ندارد و یا چسبندگی کمی دارد. این مصالح در حالت گرد شدن (ذرات ریز) و در مجاورت رطوبت و حرارت معمولی طی واکنش های شیمیایی با هیدروکسید کلسیم ترکیب هایی با خاصیت سیمانی به وجود می آورد. در استاندارد ملی ایران پوزولان ها را چنین معرفی نموده "مواد سیلیسی یا آلومینو سیلیسی که خود دارای قابلیت سیمانی شدن کم یا هیچ باشند اما به صورت پودر شده بسیار نرم در حضور رطوبت با هیدرواکسیدهای قلیایی و قلیایی خاکی در دمای معمولی واکنش های شیمیایی می دهند تا ترکیباتی را که خواص سیمانی شدن را دارند تشکیل دهند یا به تشکیل آن ها کمک کنند". مقررات ملی ساختمان پوزولان را چنین مشخص می کند "پوزولان ها عبارتند از مواد سیلیسی یا سیلیسی آلومینی که خود بتن هایی فاقد ارزش چسبانندگی هستند یا ارزش چسبانندگی آن ها کم است ، اما به صورت ذرات بسیار ریز ، در دمای متعارف در مجاورت رطوبت با هیدرواکسید کلسیم واکنش می دهد و ترکیباتی را تولید می کنند که ساختار آن ها تا حدودی شبیه ترکیباتی است که بر اثر آگیری سیمان پرتلند تولید می شود. پوزولان ها بر دو نوع هستند. پوزولان های طبیعی در انواع خام و یا تکلیس شده وجود دارند و به طور عمده شامل خاکستر های آتش فشانی غیر بلورین باشند. پوزولان های مصنوعی یا صنعتی به طور عمده شامل دوده سیلیسی، خاکستر بادی و خاکستر پوسته برنج می باشند. دوده سیلیسی یا میکروسیلیس محصول فرعی کوره های قوس الکتریکی صنایع فروآلیاژ و فروسیلیس بوده و ماده ای است با فعالیت پوزولانی بسیار شدید که بیش از ۸۵ درصد سیلیس بلوری نشده دارد. خاکستر بادی محصول فرعی زغال سنگ است که شامل سیلیس، آلومین و اکسید آهن و کلسیم است. خاکستر بادی در انواع F و C وجود دارد. نوع C خاکستر بادی به دلیل دارا بودن بیش از ده درصد اکسید کلسیم خاصیت سیمانی شدن دارد. خاکستر پوسته برنج از سوختن پوسته برنج به دست می آید و دارای میزان زیادی سیلیس غیر کریستالی است. بنابراین ضروری است که باید ماده پوزولانی به شکل پودر نرم باشد زیرا فقط در این صورت پوزولان ها می تواند در مجاورت آب با هیدروکسید کلسیم تشکیل سیلیکات های کلسیم پایدار که دارای خواص چسبندگی است بدهد.

مصرف مواد پوزولانی در بتن می تواند برای تامین یک یا چند خاصیت مشروح زیر باشد. کاهش میزان سیمان به کار رفته در بتن، کاهش سرعت و میزان حرارت حاصل از فرآیند آگیری سیمان، بهبود کارایی بتن، افزایش مقاومت دراز مدت بتن، افزایش پایدی بتن از طریق کاهش نفوذپذیری و عملکرد مناسب در برابر تهاجم یون کلرید و سولفات، عملکرد پوزولان ها برای هریک از خواص فوق ، باید قبل از مصرف مورد تایید قرار گیرد. پوزولان های طبیعی خام یا تکلیس شده که به طور عمده شامل خاکستر های آتش فشانی غیر بلورین است. استاندارد ملی ایران پوزولان های طبیعی را چنین بیان می کند "خاک های دیاتمه دار، شیل و چرت های اوپالینی، توف های شیشه ای، خاکستر های آتش فشانی و پوکه سنگ های طبیعی نمونه هایی از انواع پوزولان های است که هر کدام از آن ها به صورت کلسینه شده یا نشده به کار برده می شود. بعضی از خاک رس و شیل ها نیز پس از کلسینه شدن خواص پوزولانی قابل قبولی پیدا می کند.



پوزولان های مصنوعی یا صنعتی که به طور عمده شامل خاکستر های بادی و دوده سیلیسی و خاکستر پوسته برنج است. در استاندارد ملی ایران خاکستر بادی را چنین معرفی نموده، مواد باقی مانده بسیار نرم که حاصل احتراق ذغال سنگ پودر یا آسیاب شده که از دیگ بخار به وسیله گاز های دودکش به بیرون منتقل شده می باشد.

پوزولان های طبیعی

پوزولان های طبیعی شامل خاک های دیاتمه دار، شیل و چرت های اوپالینی، توف های شیشه ای، خاکستر های آتش فشانی و پوکه سنگ های طبیعی نمونه هایی از انواع پوزولان ها که به هنگام بیرون ریختن از دهانه آتش فشان ها به سرعت در هوا یا در زیر آب سرد شده به طوری که سیلیس موجود در آن بلوری نشده است و همچنین مواد دیگری مانند بعضی از رس ها شیل ها که برای بروز خواص پوزولانی نیاز به عملیات تکلیس دارند و از آن جمله می توان متاکاولین را نام برد. متاکاولین از کلسینه شدن کاولین به دست می آید و در کنار واکنش های سیلیکاتی - قلیایی به کار می رود. ذخایر بزرگی از پوزولان های طبیعی در نقاط مختلف کشور وجود دارد که از آن جمله می توان تراس جاجرود، پوکه سنگ هراز (دماوند)، پوکه سنگ سهند و پوکه سنگ تفتان را نام برد. در صورتی که این پوزولان ها به صورت گرد با سیمان پرتلند مخلوط شوند، هیدرواکسید کلسیم که محصول آبیگری سیمان در مجاورت رطوبت است با این سیلیس بلوری نشده در دمای محیط تشکیل سیلیکات کلسیم می دهد و سیلیکات کلسیم چسباننده اصلی کلیه ملات های آبی است.

پوزولانهای مصنوعی

پوزولان های مصنوعی واحد های نیروگاه های برقی که از ذغال سنگ به عنوان سوخت استفاده می کنند و کوره های متالورژیکی تولید چدن، فلز سیلیسیم و آلیاژهای فرو سیلیسیم مواد اصلی زاید صنعتی هستند که در این مراکز تولید می شوند. دوده سیلیسی یا میکروسیلیس محصول فرعی کوره های صنایع فرو آلیاژ و فرو سیلیس بوده و تولید شده از کوارتز با درجه خلوص زیاد و ذغال در کوره های الکتریکی با قوس مستغرق می باشد این فرآورده صنعتی با بیش از ۸۵ درصد سیلیس بلوری نشده با ذرات بی نهایت ریز و کروی شکل با قطر متوسط حدود ۰.۱ الی ۰.۲ میکرون (لازم به ذکر است که در همین جا عنوان گردد دانه سیمان به طور متوسط بین ۱۰ الی ۲۴ میکرون است) یک ماده به شدت فعال پوزولانی است. وزن مخصوص دوده سیلیسی حدود ۲.۲ گرم بر سانتی متر مکعب است.

۱-۲- سیمان پوزولانی

سیمان پوزولانی یکی از انواع پرکاربرد سیمان در صنعت ساختمان است. این سیمان دارای انواع مختلفی است که هر کدام کاربرد متفاوتی دارند. در این مقاله به طور کامل به بررسی انواع سیمان پوزولانی پرداخته و مزایا و معایب آن را بیان می کنیم. سیمان یک مصالح ساختمانی پر کاربرد است که برای اتصال و چسبندگی بین اجزای سازه کاربرد دارد. علاوه بر کاربرد گفته شده، این ماده از ترکیبات اصلی بتن است که در اکثر سازه ها مورد استفاده قرار می گیرد. در مقاله انواع سیمان گفتیم که یکی از انواع این متریال، سیمان پوزولانی است. پوزولان خاکستر آتشفشانی است که حاوی مواد معدنی سیلیسی و آلومینیومی است. سیمان پوزولانی از ترکیب این مواد با سیمان پرتلند، به دست می آید. سیمان های پوزولانی یا Portland Pozzolana cement (ppc) از انواع سیمان های آمیخته هستند و از مخلوط کامل و یکنواخت نوع پرتلند و پوزولان بدست می آیند. این نوع سیمان ها نسبت به سیمان پرتلند معمولی دارای خواص بهبود یافته مکانیکی و شیمیایی بوده و به علت مزایایی مانند قیمت پایین و مقاومت مناسب، بسیار پر کاربرد هستند. پوزولان ها نوعی از مواد نسوز هستند که در چند فرمول مختلف در بازار وجود دارند. سیمان پوزولانی ساخته شده با این فرمول ها مزیت زیادی دارد و همانطور که گفتیم باعث بهبود خواص سیمانی می گردند. برای اندازه گیری میزان فعالیت مواد پوزولانی به مقدار واکنش پذیری آن با Ca(OH)_2 و آب توجه می شود. به عبارتی می توان گفت ماهیت و اندازه بسیار ریز ذرات آلومینا یا سیلیس باعث ایجاد چنین واکنشی می شود. پوزولان در بتن باعث کاهش خوردگی و در نتیجه افزایش عمر سازه بتنی می گردد. عملکرد پوزولان به این صورت است که منافذ و فضای خالی که در سیمان پرتلند عادی پس از خشک شدن به وجود می آید را از بین برده و به این ترتیب باعث بهبود مقاومت در برابر عوامل محیطی می گردد. سیمان پرتلند پوزولانی به سه روش زیر تولید می شود:

روش اول: پودر کردن کلینکر سیمان پرتلند، پوزولان و سنگ گچ در آسیاب به صورت همزمان

روش دوم: سایش جداگانه پوزولان و آمیختن آن با سیمان های پرتلند



۲-۱-۱- انواع سیمان پرتلند پوزولانی بر اساس استاندارد ملی ایران

مطابق استاندارد شماره ۳۴۳۲ ملی ایران بر دو گروه اند:

پرتلند پوزولانی (پ.پ) با میزان پوزولان حداقل ۵ و حداکثر ۱۵ درصد وزنی سیمان پرتلند پوزولانی ویژه (پ.پ.و) با میزان پوزولان بیش از ۱۵ تا ۴۰ درصد وزنی سیمان

۲-۳- انواع سیمان پوزولانی

به سه دسته طبیعی، مصنوعی و ویژه تقسیم می‌شوند که عبارتند از:

۲-۳-۱- سیمان پوزولانی طبیعی

نوعی است که در آن از پوزولان‌های طبیعی استفاده می‌شود. این مواد عبارتند از:

خاک‌های دیاتمه‌دار، توف‌های شیشه‌ای، خاکستر آتشفشانی و پوکه سنگ‌های طبیعی که مواد آتشفشانی هستند و به هنگام بیرون ریختن از دهانه آتشفشان به سرعت و قبل از بلوری شدن سیلیس موجود، سرد می‌شوند. از طرفی بعضی مواد دیگر مانند متاکائولین که از کلسینه شدن کائولین به دست می‌آید نیز دارای خواص پوزولانی هستند. ایران ذخایر بزرگی از انواع پوزولان‌های طبیعی را داشته و به نوعی از صادرکنندگان بزرگ پوزولان طبیعی در دنیا به شمار می‌رود. از ذخایر پوزولان‌های طبیعی در ایران می‌توان پوکه سنگ سهند، پوکه سنگ هراز، تراس جاجرود و پوکه سنگ تفتان را نام برد. اگر این پوزولان‌ها به صورت پودر بسیار ریز با نوع پرتلند مخلوط شوند، هیدروکسید کلسیم که از آبیگری سیمان در مجاورت رطوبت به وجود آمده با سیلیس بلوری نشده موجود در پوزولان در دمای محیط، سیلیکات کلسیم تشکیل داده که این ماده چسبنده برای تمامی ملات‌های آبی است.

۲-۳-۲- سیمان پوزولانی مصنوعی

این ماده از نیروگاه‌هایی که سوخت آن‌ها زغال سنگ است به دست می‌آید. همچنین می‌توان از کوره‌های متالورژیکی که در تولید آلیاژهای چدن و سیلیسیم کاربرد دارند نیز برای تهیه پوزولان مصنوعی استفاده کرد. این پوزولان‌ها عبارتند از:

سرباره کوره آهن‌گذاری، دوده سیلیس، خاکستر پوسته برنج و رس کلسینه شده.

در پوزولان‌های مصنوعی به مقدار ۸۵ درصد، سیلیس بلوری نشده وجود دارد. قطر متوسط ذرات بلوری نشده در سیمان پوزولانی مصنوعی به اندازه حدودا ۱/۰ تا ۲/۰ میکرون است.

امروزه کاربرد پوزولان‌های مصنوعی در کشورهای صنعتی افزایش یافته چرا که این متریال آلودگی محیط زیست را کاهش می‌دهد.

۲-۳-۳- سیمان پوزولانی ویژه

نوعی است که دارای مقاومت و کیفیت بالایی بوده و به علت ویژگی‌هایی که دارد توانسته جایگاه خوبی در چند سال گذشته پیدا کند. کاربرد این نوع متریال در بتن‌ریزی‌های حجیم مانند سدها، فونداسیون، پل‌ها و همچنین در مناطقی که بتن تحت تهاجم شیمیایی قرار داشته و احتمال واکنش‌های قلیایی و سیلیکاتی وجود دارد، است. این ماده، در برابر املاح شیمیایی مقاوم بوده و حرارت هیدراسیون آن کم است. مقاومت فشاری این سیمان در روزهای اولیه (تا سه روز) کم است.

۳- مصالح استفاده شده در طرح اختلاط

در این تحقیق از نانو سیلیس و پودر شیشه در ترکیب بتن استفاده شده است. سیمان مصرفی از نوع ۴۲۵-۱ و اب مصرفی آب شهری می‌باشد که مشخصات مصالح در قسمت زیر بیان شده است.



۳-۱- نانو سیلیس

نانو سیلیس (Nano Silica) که به نانو ذرات سیلیکا هم معروف است، یکی دیگر از افزودنی‌ها به ترکیب بتنی می‌باشد که همانند میکروسیلیکا بر پایه یک ترکیب پوزولانی تشکیل شده است. این ماده در افزایش مقاومت و استحکام بتن نقش بسیار مهمی دارد؛ به طوری که با افزایش نانو سیلیس به ترکیب ماسه برای ساخت بتن، استحکام و مقاومت آن در مقایسه با یک بتن معمولی افزایش پیدا خواهد کرد. امروزه نانو سیلیس به دو شکل پودر و ژل، و در دو نوع نانو سیلیس آب گریز و تعلیق وجود دارد، که هر کدام با توجه به کاربردی که دارند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. به طور کلی نانو سیلیس علاوه بر استفاده در ساخت بتن و مصالح ساختمانی، در بخش‌های دیگری چون پزشکی، تولیدات پلاستیک، ریخته‌گری و ... نیز استفاده می‌شود.

کاربرد نانو سیلیس در بتن

ساخت بتن‌هایی با مقاومت بسیار بالا

استفاده در سازه‌های سدها، تونل‌ها، کانال‌های آبی، کف سازی و اسکله‌ها

بتن‌ریزی در سطح وسیع و گسترده، استفاده به عنوان عایق‌های حرارتی و الکتریکی

افزایش طول عمر بتن در برابر خوردگی، عوامل مخرب خارجی

مناسب با آب و هوای مرطوب و استفاده در سازه‌های کنار سواحل

استفاده در ساخت سازه‌های نظامی

استفاده در ساخت انواع بتن‌های از پیش ساخته شده و متراکم

نحوه استفاده نانو سیلیس

مقدار استفاده از نانو ذرات سیلیس در بتن، به سطح مورد نظر بستگی دارد. اگر نانو سیلیس حالت مایع داشته باشد، باید با مواد تر و آب ترکیب شود و اگر حالت جامد و پودری داشته باشد، باید مستقیماً با مواد خشک ترکیب شود و به هیچ عنوان نباید آن را مستقیم با آب مخلوط کرد، تا کیفیت و کارایی اولیه خود را حفظ کند. به طور کلی برای استفاده دقیق‌تر از نانو سیلیس در ترکیب بتنی باید آزمایشگاه مورد نظر مشخص کند که چه مقدار از این ترکیب وارد ترکیب بتنی شود تا مقاومت و استحکام بتن را افزایش دهد.

۳-۱-۱- مزایای نانو سیلیس

تأثیر نانو سیلیس بر مقاومت بتن در برابر گرما، خوردگی و واکنش‌های شیمیایی

پایین بودن هزینه اقتصادی و به صرفه بودن آن

افزایش استحکام و مقاومت بتن در برابر عوامل مخرب محیطی

جلوگیری از ورود هرگونه هوا به داخل بتن

افزایش مقاومت بتن در برابر فشارهای کششی خارجی تا ۴۰ درصد

افزایش مقاومت بتن در برابر فرسایش و استهلاک سازه‌ها

افزایش تراکم، انسجام ترکیب بتنی و غیرقابل نفوذ بودن ترکیب نسبت به آب

قابلیت ترکیب با هرنوع سیمان

تحمل حرارت بالا و گرما به دلیل داشتن نقطه جوش و ذوب بالا

۳-۲- پودر شیشه

پودر شیشه کاربرد زیادی در سطوح مختلف صنعت همچون تزیینات ساختمان یا صنایع دیگر دارد و قیمت و تنوع کیفیت آن برای تولید کنندگان بسیار مهم است به همین دلیل خرید و فروش پودر شیشه و قیمت پودر شیشه مناسب برای مصرف صنعتی به عنوان قطعه یا کالای شیشه ای از اهمیت بالایی برخوردار است که مصرف رو به افزایشی در میان قطعات صنعتی در سراسر دنیا دارد. پودر شیشه به عنوان یک پلیمر جامد و در اصطلاح عامیانه پودر شیشه‌ای شناخته می‌شود که یک جزء مایع یا جامد که شامل دو یا چند جز است تشکیل شده است. در واقع پودر شیشه به عنوان یک افزودنی در صنایع مختلف برای ساخت برخی از اشکال مختلف و محصولات متنوعی استفاده می‌شود و کاربرد فراوان دارد. پودر شیشه



دارای کاربردهای فراوانی در صنعت است که می‌توان به انواع پودر شیشه مات، شیشه رفلکس، آینه‌ای، و غیره اشاره کرد. پودر شیشه به دلیل خاصیت چسبندگی که دارد در پوشش دهی سطوح شیشه‌ای کاربرد گسترده‌ای دارد. از جمله موارد استفاده این پودر شیشه می‌توان در پوشش دادن، لعاب دادن، ایجاد رنگ، شفافیت، افزایش مقاومت، پوشش و غیره نام برد. برای خرید و فروش پودر شیشه با ما در شرکت باسکول در ارتباط باشید. یکی از مصارف بسیار عمده پودر شیشه در تولید شیشه‌های نشکن است.

۳-۳- سیمان ۱-۴۲۵

این سیمان طبق استاندارد ملی ایران به شماره ۳۸۹ ISIRI، تولید می‌شود که دارای مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان ۱-۳۲۵ می‌باشد. لیکن دارای مقاومت فشار اولیه (۲ روزه) حداقل ۱۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع و مقاومت نهایی (۲۸ روزه) حداقل ۴۲۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع و حداکثر ۶۲۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع می‌باشد که یک سیمان زود سخت شونده محسوب شده و در کلیه سازه‌های بتنی مسلح و غیر مسلح که نیاز به مقاومت اولیه و نهایی بیشتر می‌باشد، قابلیت کاربرد دارد. استفاده در بتنهای معمولی به شرح بیان شده بجای سیمان ۱-۳۲۵، کلیه ستونها، سقفها، دال پلها، سازه‌هایی که نیاز به بازکردن سریع قالب است و بتن ریزی در هوای سرد، زمینه‌های کاربرد این سیمان می‌باشد.

۳-۴- روان کننده کربوکسیلاتی

برای کاهش مقدار آب در ترکیب از فوق روان کننده کربوکسیلاتی ساخت کشور المان استفاده شده است که مقدار استفاده آن نیز ۲ درصد وزن سیمان بوده که موجب کاهش آب تا ۳۰ درصد وزن سیمان شده است. مشخصات فوق روان کننده به شرح زیر می‌باشد. آنالیز شیمیایی و فیزیکی روان کننده مورد نظر به شرح زیر می‌باشد:

جدول ۱. آنالیز فیزیکی و شیمیایی روان کننده

light-burnt magnesia		bischofite	
Component	Content (wt%)	Component	Content (wt.%)
Magnesium oxide (MgO)	85.24	Magnesium chloride (MgCl ₂)	46.43
Calcium oxide (CaO)	1.64	Potassium chloride (KCl)	0.21
Aluminium oxide (Al ₂ O ₃)	0.21	Sodium chloride (NaCl)	0.36
Silicon dioxide (SiO ₂)	4.70	Calcium chloride (CaCl ₂)	0.01
Ferric oxide (Fe ₂ O ₃)	0.29	Magnesium sulfate (MgSO ₄)	0.02
Loss on ignition	7.92	Water insolubles	0.07
-	-	Crystal water	52.90

۳-۵- طرح اختلاط بتن

باتوجه به موضوع تحقیق طرح اختلاط مورد نظر طبق تابلوی زیر طراحی گردیده و نمونه‌های بتنی جهت انجام آزمایش در ابعاد ۵ سانتیمتری مکعبی برای انجام آزمایشهای مقاومت فشاری و کربناته شدن و جذب آب و همچنین آزمایش ذوب و انجماد تهیه گردیدند.



جدول ۲. طرح اختلاط نمونه های طراحی شده

روان کننده kg/M3	پودر شیشه kg/M3	نانو سیلیس kg/M3	آب به لیتر	سیمان سفید kg/M3	ماسه سیلیسی kg/M3	نام نمونه
۹	۰	۰	۱۳۵	۴۵۰	۱۸۱۵	نمونه شاهد
۹	۰	۹۰.۷۵۰	۱۳۵	۴۵۰	۱۷۲۴.۲۵۰	Sn1
۹	۰	۱۸۱.۵	۱۳۵	۴۵۰	۱۶۳۳.۵	Sn2
۹	۰	۲۷۲.۲۵۰	۱۳۵	۴۵۰	۱۵۴۲.۲۵۰	Sn3
۹	۰	۳۶۳	۱۳۵	۴۵۰	۱۴۵۲	Sn4
۹	۲۷۲.۲۵۰	۹۰.۷۵۰	۱۳۵	۴۵۰	۱۷۲۴.۲۵۰	Sng1
۹	۱۸۱.۵	۱۸۱.۵	۱۳۵	۴۵۰	۱۶۳۳.۵	Sng2
۹	۹۰.۷۵۰	۲۷۲.۲۵۰	۱۳۵	۴۵۰	۱۵۴۲.۲۵۰	Sng3
۹	۳۶۳	۰	۱۳۵	۴۵۰	۱۴۵۲	Sng4
۹	۲۷۲.۲۵۰	۰	۱۳۵	۴۵۰	۱۷۲۴.۲۵۰	Sg1
۹	۱۸۱.۵	۰	۱۳۵	۴۵۰	۱۶۳۳.۵	Sg2
۹	۹۰.۷۵۰	۰	۱۳۵	۴۵۰	۱۵۴۲.۲۵۰	Sg3

در تحقیق انجام شده بتن با توجه به جدول ۴. ترکیب و پس از رسیدن به سن مورد نظر تحت آزمایشهای ۲۸ و ۹۰ روزه قرار گرفتند.

۴- برنامه آزمایشگاهی

همانطور که در تابلوی بالا مشاهده می نمایم ۱۲ نمونه بتنی که در آنها به مقدارهای مشخص شده از سیلیس و نانو سیلیس و پودر شیشه همراه با ۲ درصد روان کننده استفاده شده است دیده می شود. در این نمونه ها به ترتیب نانو سیلیس و پودر شیشه از ۵ تا ۲۰ درصد به اختلاف ۵ درصد جایگزین ماسه سیلیسی شده است و در سه نمونه وسط نیز این دو ماده با درصدهای مساوی به جای ماسه سیلیسی استفاده شده است.

۵- نتایج

۵-۱- آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه ها با توجه به استاندارد مربوطه به شماره ASTM C39-86 انجام شده است که نتایج حاصل از این آزمایش در ۷ و ۲۸ و ۴۲ روزگی در جدول زیر ارایه گردیده و بررسی گردیده است.

جدول ۳. نتایج آزمایش مقاومت فشاری

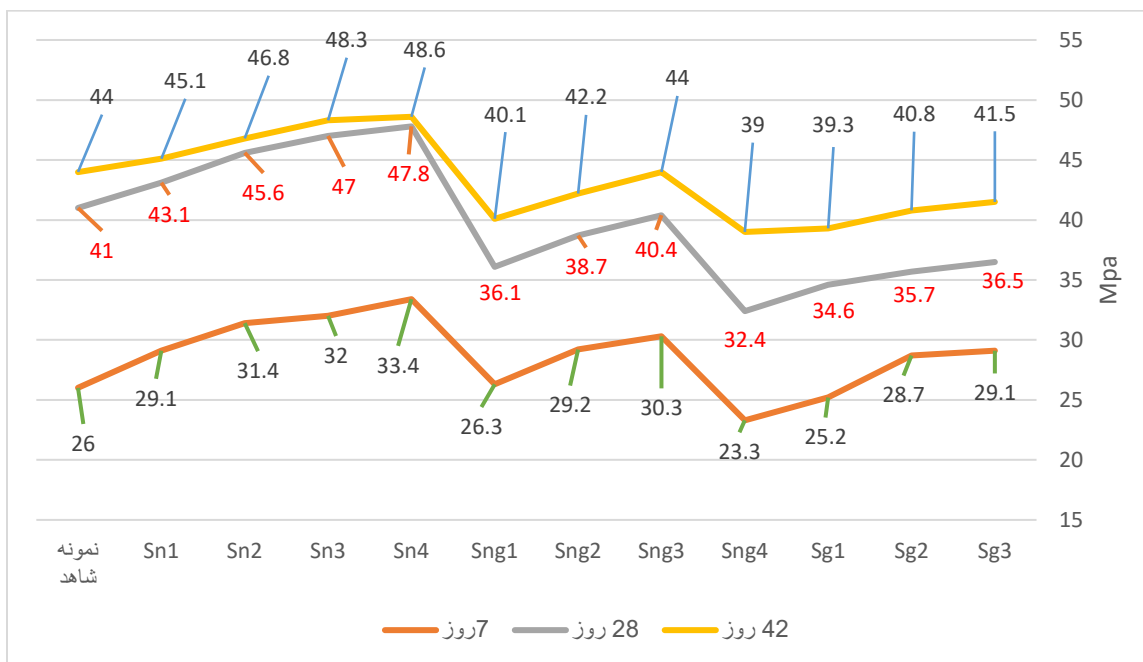
نام نمونه	نمونه شاهد	Sn1	Sn2	Sn3	Sn4	Sng1	Sng2	Sng3	Sng4	Sg1	Sg2	Sg3
۷ روز	۲۶	۲۹.۱	۳۱.۴	۳۲	۳۳.۴	۲۶.۳	۲۹.۲	۳۰.۳	۲۳.۳	۲۵.۲	۲۸.۷	۲۹.۱
۲۸ روز	۴۱	۴۳.۱	۴۵.۶	۴۷	۴۷.۸	۳۶.۱	۳۸.۷	۴۰.۴	۳۲.۴	۳۴.۶	۳۵.۷	۳۶.۵
۴۲ روز	۴۴	۴۵.۱	۴۶.۸	۴۸.۳	۴۸.۶	۴۰.۱	۴۲.۲	۴۴	۳۹	۳۹.۳	۴۰.۸	۴۱.۵

به دقت در جدول ۳ مشاهده می نمایم که نمونه های بتنی با افزودن نانو سیلیس مقاومت بهتری نسبت به نمونه های شاهد داشته است و با افزایش نانو سیلیس مقاومت فشاری نیز رو به افزایش بوده است که با افزایش آن بعد از ۱۰ درصد هرچند که مقاومت افزایشی بوده است ولی نسبت تاثیر آن به مراتب کمتر گردیده است و از دیدگاه اقتصادی بعد از ۲۰ درصد مقرون به صرفه نبوده است. در نمونه های بعدی که به صورت مشترک و درصدهای متفاوت تا ۲۰ درصد بصورت ۵ به ۱۵ و ۱۰ به ۱۰ نانو سیلیس و پودر شیشه جایگزین سیمان گردیده است که نمونه ها نسبت به نمونه دارای نانو سیلیس خالص با افت بالایی مواجه گردیده است و نسبت به نمونه شاهد نیز در ۷ روزه اول افزایش ولی در سنین بالاتر



روند نزولی داشته است به صورتی که در نمونه شاهد از ۲۶ مگاپاسکال نمونه شاهد به ۲۶.۳ الی ۳۰.۳ رسیده است و در آزمایشهای سنین بالاتر نیز نمونه ها تا حدودی به مقاومت نمونه شاهد رسیده اند.

در چهار نمونه پایان جدول ۱-۲ که پودر شیشه تا ۲۰ درصد جایگزین سیمان گردیده است وضعیت به مراتب بحرنتر بوده و مقاومت نمونه بتنی تا ۲۳.۳ مگاپاسکال در ۲۰ درصد و ۲۹ مگاپاسکال در ۵ درصد کاهش یافته است که این حدود ۱۰ درصد نسبت به نمونه شاهد نزول را نشان می دهد و نمونه ها با گذشت زمان نیز ۱۵ الی ۲۰ درصد با توجه به درصد اختلاط پودر شیشه و سس بتن کاهش داشته است.



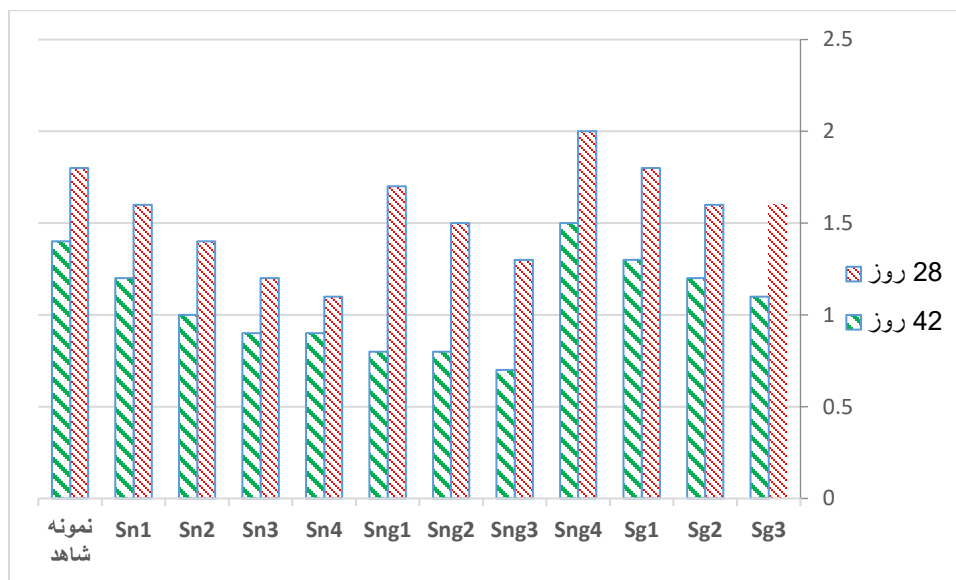
شکل ۱: مقاومت فشاری در گروههای اختلاطی بتن

با دقت در نمودار بالا مشاهده می نماییم که رفتار نمونه ها در سنین متفاوت رفتاری نزدیک هم داشته اند و هر سه نمودار از لحاظ شکل ظاهری شبیه هم هستند. نمونه های دارای نانو سیلیس نسبت به دیگر نمونه ها در همه سنین مقاومت بیشتری از خود نشان داده است و این در حالی است که نمونه های تهیه شده با پودر شیشه کمترین مقاومت را دربر داشته اند. و نمونه های دارای ترکیبی از این دو افزودنی کاملاً در حد وسط بوده اند که این نشانگر آن است که با افزایش نانو سیلیس مقاومت صعودی و بالعکس با افزایش پودر شیشه مقاومت نزولی بوده است.

جدول ۴. نتایج آزمایش درصد جذب آب نمونه ها

نام نمونه	نمونه شاهد	Sn1	Sn2	Sn3	Sn4	Sng1	Sng2	Sng3	Sng4	Sg1	Sg2	Sg3
۲۸ روز	۱.۸	۱.۶	۱.۴	۱.۲	۱.۱	۱.۷	۱.۵	۱.۳	۲	۱.۸	۱.۶	۱.۶
۴۲ روز	۱.۴	۱.۲	۱	۰.۹	۰.۹	۰.۸	۰.۸	۰.۷	۱.۵	۱.۳	۱.۲	۱.۱

در جدول شماره ۴ مقدار جذب آب نمونه ها نشانگر آن هست که مقدار مقاومت در نمونه ها رابطه مستقیم با جذب آب آنها داشته است و با افزایش مقدار نانو سیلیس جذب آب در سنین ۲۸ و ۴۲ روزگی به حداقل خود رسیده و با افزایش نانو سیلیس نیز این روند نزولی بوده است. هر چه مقدار نانو سیلیس کاهش یافته و مقدار پودر شیشه افزایش یافته است به علت بالا بودن جذب آب این پودر و پایین بودن مقاومت نمونه جذب آب بیشتری از خود نشان داده اند که این امر در نمونه دارای ۲۰ درصد پودر شیشه با ۲ درصد در جذب آب در ۲۸ و ۱.۵ درصد در ۴۲ روزگی بیشترین مقدار را داشته است.



شکل ۲: مربوط به روند جذب آب نمونه ها

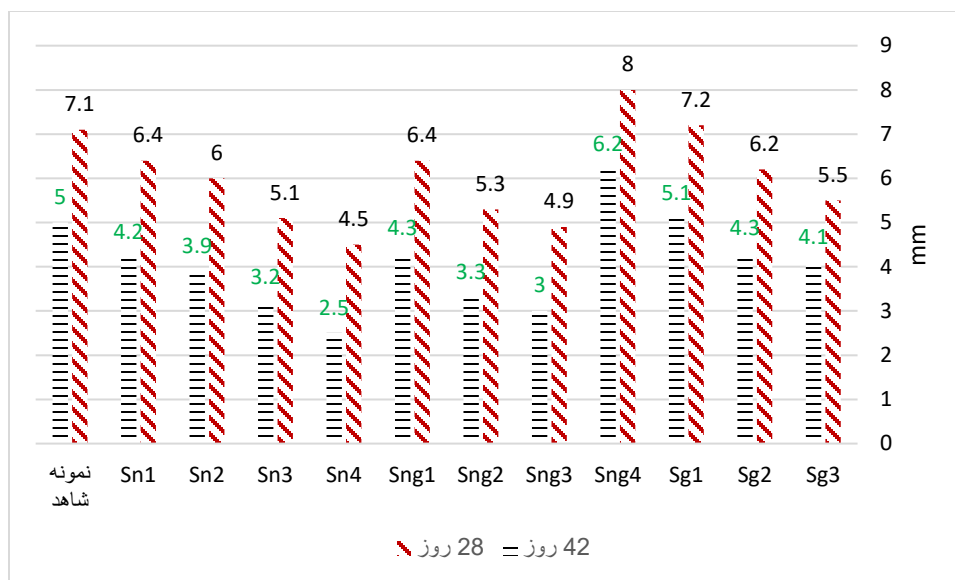
در نمودار ۲ مشاهده میگردد نمونه ها به صورت کاملاً نزولی با افزایش نانو سیلیس جذب آب خود را کاهش داده اند و در راستای مقاومت فشاری نیز با افزایش پور شیشه میزان جذب آب نیز افزایش داشته است. این روند به صورت کامل بر روی نمودار مشهود می باشد و نمونه های دارای ترکیب نانو سیلیس با پودر شیشه نیز با افزایش مقدار پودر شیشه جذب آب بیشتری داشته است.

۲-۵- آزمایش کریناته شدن

با توجه به جدول ۵ میتوان مقدار کریناته شدن را در انواع بتنهای تهیه شده مشاهده نمود. در این نمونه ها مقدار کریناته شدن با افزایش سن بتنها کاهش داشته است که کمترین مقدار کریناته شدن در نمونه های دارای نانو سیلیس بوده است که با افزایش این افزودنی در ترکیب بتن نمونه ها نیز مقاومت بیشتری در مقابل کریناته شدن از خود نشان داده اند. نمونه های دارای ۲۰ درصد نانو سیلیس به ۲.۵ میلیمتر کمترین و نمونه دارای ۲۰ درصد پودر آلومینیوم با ۶.۲ میلی متر بیشترین کریناته شدن را نشان داده اند.

جدول ۵. مقدار کریناته شدن نمونه ها به میلیمتر

نام نمونه	نمونه شاهد	Sn1	Sn2	Sn3	Sn4	Sng1	Sng2	Sng3	Sng4	Sg1	Sg2	Sg3
۲۸ روز	۷.۱	۶.۴	۶	۵.۱	۴.۵	۶.۴	۵.۳	۴.۹	۸	۷.۲	۶.۲	۵.۵
۴۲ روز	۵	۴.۲	۳.۹	۳.۲	۲.۵	۴.۳	۳.۳	۳	۶.۲	۵.۱	۴.۳	۴.۱



شکل ۳: مربوط به میزان کربناته شدن نمونه ها

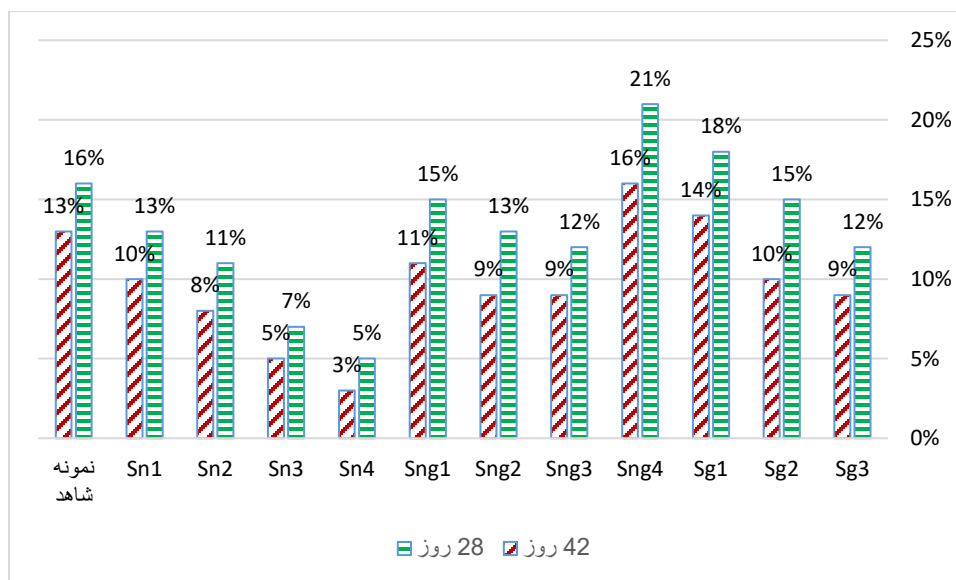
در نمودار ۳ روند کربناته شدن کاملاً محسوس است و مشاهده می گردد که افزایش مقدار نانو سیلیس تاثیر مثبت بر روی نمونه ها داشته است و مقدار پودر شیشه مقدار کربناته شدن را افزایش داده است. روند نزولی نیز در نمونه های دارای پودر شیشه کاملاً ملموس می باشد.

۳-۵- آزمایش ذوب و انجماد

در آزمایش ذوب و انجماد درصد افت مقدار مقاومت در نتیجه انجماد و ذوب متوالی به شرح جدول ۶ می باشد. در نمونه های مذکور مشاهده می گردد که بهترین نتیجه مربوط به نمونه دارای ۲۰ درصد نانو سیلیس با ۵ درصد در ۲۸ و ۳ درصد در ۴۲ روزگی نمونه ها بوده است. و ضعیفترین نمونه ها نیز نمونه های دارای پودر شیشه بوده اند که نمونه دارای ۲۰ درصد پودر شیشه با ۲۱ درصد در ۲۸ و ۱۶ درصد در ۴۲ روزگی را نسبت به نمونه شاهد که به ترتیب ۱۶ و ۱۳ درصد بوده است به خود اختصاص داده است

جدول ۶: مقدار افت مقاومت در نمونه ها تحت ذوب و انجماد به درصد

نام نمونه	نمونه شاهد	Sn1	Sn2	Sn3	Sn4	Sng1	Sng2	Sng3	Sng4	Sg1	Sg2	Sg3
۲۸ روز	٪۱۶	٪۱۳	٪۱۱	٪۷	٪۵	٪۱۵	٪۱۳	٪۱۲	٪۲۱	٪۱۸	٪۱۵	٪۱۲
۴۲ روز	٪۱۳	٪۱۰	٪۸	٪۵	٪۳	٪۱۱	٪۹	٪۹	٪۱۶	٪۱۴	٪۱۰	٪۹



شکل ۴: درصد افت مقاومت فشاری تحت انجماد و ذوب نمونه ها

با توجه به نمودار ۴ میزان افت مقاومت حالت پلکانی داشته است که در تمام ترکیبها این حالت حفظ گردیده است. نمونه ها روند نزولی و صعودی متقارنی داشته اند و مواد افزوده شده نیز روندی متعادل بر روی نمونه های بتنی با توجه به افزایش و کاهش خود داشته اند. با توجه به داده های موجود ترکیب پودر شیشه و نانو سیلیس همگنی خوبی باهم نداشته اند و با کاهش مقدار پودر شیشه نتایج بهتر و با افزایش نانو سیلیس مقاومت ها و نتایج افزایشی بوده است که با ترکیب این دو افزودنی نیز همین سیر تکرار شده است.

۶- نتایج و توصیه ها

با توجه به آزمایشات انجام شده نتایج حاصل از آزمایشها مشاهده می نماییم که پودر شیشه که از فرآیند آسیاب کردن شیشه های پسماند حاصل گردیده بوده است در رومد مقاومت فشاری تاثیر منفی داشته و با افزایش آن نیز کاهش مقاومت بتن قابل رویت است. پودر شیشه علاوه بر مقاومت فشاری در تمامی آزمایشهای انجام شده اعم از جذب آب و کرناته شدن و ذوب و انجماد نیز تاثیر مثبتی بر روی هیچ کدام از نمونه ها نداشته است. نمونه های بتنی حاوی ۲۰ درصد نانو سیلیس در همه آزمایشها بهترین نتیجه را داشته اند و در دیگر نمونه ها با کاهش نانو سیلیس مقدار مقاومت نیز کاهش داشته است به طوری که نمونه دارای ۵ درصد نانو سیلیس در ۴۲ روزگی ۴۵ مگاپاسکال مقاومت داشته است که حتی با کمترین درصد نیز از نمونه شاهد که ۴۵ مگاپاسکال بوده است پیشی گرفته است. بر خلاف نانو سیلیس پودر شیشه در مقاومتها و آزمایشهای ۴۲ روزه خود حتی با ۵ درصد نیز نتوانسته است تا به مقاومت نمونه شاهد برسد که با توجه بن نتایج با افزایش پودر شیشه نتیجه کار نیز بسیار ضعیف تر بوده است. در پایان با توجه به نتایج حاصل از آزمایشها میتوانیم موارد زیر را حاصل نماییم:

- ۱- پودر شیشه تاثیر منفی بر روی نمونه های بتنی داشته است.
- ۲- ترکیب پودر شیشه همراه با نانو سیلیس هیچ واکنشی را حاصل نکرده و روند مثبتی به نانو سیلیس نداده است.
- ۳- نانو سیلیس به تنهایی توانست مقاومت فشاری بتن و دیگر خواص فیزیکی آن را ارتقا بخشد.
- ۴- افزایش نانو سیلیس تاثیر مثبت بر روی بتن داشته است به طوری که در این تحقیق با افزایش از ۵ به ۲۰ درصد نیز مقاومت فشاری را افزایش داده است.
- ۵- بالا رفتن مقاومت ها با افزودن نانو سیلیس تاثیر مستقیم بر کرناته شدن داشته است و مقدار آن را به صورت چشمگیری کاهش داده است.



توصیه ها:

- ۱- با توجه به نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری توصیه می گردد از پودر شیشه در بتن‌ها جهت کاربرد سازه ای استفاده نگردد.
- ۲- پیشنهاد می گردد از نانوسیلیس تا ۵۰ درصد وزن سیمان استفاده گردد تا ماکسیمم مقدار برای رسیدن به نقطه عطف آن تثبیت گردد.
- ۳- پیشنهاد می گردد در کنار نانو سیلیس از یک ماده افزودنی که حالت اکتیویته و پوزولانی دارد استفاده شود.
- ۴- پیشنهاد می گردد اگر از پودر شیشه به عنوان ماده افزودنی استفاده می گردد فقط به عنوان پر کننده استفاده و از لحاظ مقاومتی انتظاری از آن نداشته باشیم.
- ۵- در نمونه های دارای نانو سیلیس از عمل آوری به صورت بخار نیز استفاده گردد.

۷- مراجع

- 1-Air Permeability Versus Sorptivity: Effects of Field Curing on Cover Concrete After One Year Old Field Exposure, Magazine of Concrete Research, 52: 17-24.
- 2-Barker D., Turner S., Napier-Moore P., Clark M. and Davison J. (2009). CO2 capture in the cement industry, Energy Procedia, 1: 87-94.
- 3-Bayasi, Z., and Zhou, J. (1993). Properties of Silica Fume Concrete and Mortar, American Concrete Institute Materials Journal, 90: 349-356.
- 4-Belkowitz J., and Armentrout D.L. (2009). The investigation of nano-silica in the cement hydration process.
- 5-Alasali M.M. and Malhotra V.M. (1991). Role of concrete incorporating high volumes of fly ash in controlling expansion due to alkali-aggregate reaction.
- 6-American Concrete Institute Material 88: 63 - 159. Aldea, C.M., Young, F., Wang, K. and Shah, S.P. (2000).
- 7-Effects of curing conditions on properties of concrete using slag replacement, Cement and Concrete Research, 30: 465-472.
- 8-Anonim, (2007). USGBC, LEED rating system, version 3.0, US Green Building Council, Washington. ASTM C 618, (2000).
- 9-Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, Annual Book of ASTM Standard, No. 04.02.
- 10-American Concrete Institute Special Publication, 267: 87-100. Bentur, A., Bonen, D. and Goldman, A. (1993).
- 11-Discussion of a Paper by Chong, X.. at all. Roll of Silica Fume in Compressive Strength of Cement Paste, Mortar and Concrete.
- 12-American Concrete Institute Material Journal, 376. Bicer A. (2018). Effect of fly ash particle size on thermal and mechanical properties of fly ash-cement composites, Thermal Science and Engineering Progress, 8: 78-82.
- 13-American Concrete Institute Committee, (1995). Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete, American Concrete Institute, Detroit, USA, ACI 95 - 233.
- 14-American Concrete Institute Committee 226, (1987). Silica Fume in Concrete, American Concrete Institute Material Journal, 84: 158-166.
- 15-Ahmaruzzaman, M., (2010). A Review on the Utilization of Fly Ash, Progress in Energy and Combustion Science 36: 327-363.